

ТЕСЛЯ С.Ю., СТЕПАНЧУК А.М., БІЛИК І.І.

(КПІ ім. Ігоря Сікорського)

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТИВ  
САМОФЛЮСІВНИЙ СПЛАВ – ПЛАВЛЕНІ КАРБІДИ  
ВОЛЬФРАМУ ТА НІОБІЮE-mail: [astepanchuk@iff.kpi.uam](mailto:astepanchuk@iff.kpi.uam)

**АНОТАЦІЯ.** Досліджено закономірності формування структури та властивостей композиційних покриттів системи самофлюсівний сплав (СФС) – карбіди перехідних металів, в литому стані (РЕЛІТ, карбід ніобію). Встановлено, що методом просочення можна отримати щільні покриття, з утворенням якісного контакту компонентів між собою та з основою. Показані основні етапи формування структури композитів. Виявлено, що при просоченні має місце розчинність тугоплавкої складової в розплаві самофлюсівного сплаву. При цьому розчинність РЕЛІТу в СФС більша, ніж розчинність карбіду ніобію, що зумовлено більшою енергією на межі зерен. Розчинність збільшується зі збільшенням кривизни поверхні.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** композиційні покриття; литі карбіди; розчинність карбідів; самофлюсівний сплав; формування структури.

Практика експлуатації різноманітного технічного устаткування показала, що велика його частина втрачає працездатність унаслідок зношування окремих його деталей та механізмів [1], які вимагають заміни або відновлення. Найбільш оптимальним способом підвищити ресурс роботи таких деталей, є нанесення покриттів різноманітного функціонального призначення.

Для захисту від абразивного та газоабразивного зношування перспективним є створення на робочих поверхнях композиційних покриттів з нерівноважною структурою. В основі створення таких покриттів лежить структурна особливість, при якій в пластичній матриці рівномірно розподілені включення твердої фази. Перспективними матеріалами, які можуть бути використані як тверда складова композиційних матеріалів, можуть бути гранули з твердих тугоплавких сполук (ТТС), перш за все карбідів та боридів перехідних металів IVa– VIa підгрупи таблиці Д.І. Менделєєва [2]. Як металеву зв'язку доцільно використовувати самофлюсівні сплави на основі заліза (СФЗ) та нікелю (СФН) [3].

На сьогоднішній час досить широкого застосування для створення зносостійких композиційних покриттів знайшов карбід вольфраму (РЕЛІТ) [4-5]. Але у зв'язку з дефіцитністю вольфрамової сировини у світі, і особливо в Україні, доцільним є розробка подібних матеріалів за участю інших твердих тугоплавких спо-

лук. У цьому відношенні, як показано в роботах [6-7], перспективним є використання карбіду ніобію.

Тому в роботі була поставлена мета дослідити умови формування структури композиційних матеріалів за участю карбіду ніобію у порівнянні з композиційними матеріалами за участю карбіду вольфраму, від якої багато у чому залежать експлуатаційні властивості матеріалів. Також досліджувався вплив на формування структури матеріалу металевої зв'язки з самофлюсівних сплавів на основі заліза та нікелю. Гранули готували з плавленого карбіду ніобію, який отримували за методикою викладеною в роботі [8]. Використання плавлених карбідів є більш придатним тому, що вони мають 100 % щільність, малу кількість домішок, гранули з них мають більшу міцність у порівнянні з гранулами, отриманими іншими методами [9].

Матеріали з вказаних композицій отримували просоченням гранул з карбідів у стані утруски розплавом самофлюсівних сплавів взятих у кількостях для забезпечення стовідсоткового просочення. Процес просочення проводили у печі опору на повітрі за температури 1300°С на протязі 5 хвилин.

Вивчався вплив розміру гранул на структуру та твердість отриманих композицій. Використовували гранули з середнім розміром 500 (-063+04), 360 (-04+0315) та 260 (-0315+02) мкм.

Дослідження структури отриманих матеріалів свідчить (рис. 1), що вона є гетерогенною і складається з гранул (зерен) карбідів і матриці з самофлюсівного сплаву. При цьому має місце стовідсоткове просочення гранул з утворенням якісного контакту між складовими композицій. Слід відмітити, що отримані результати підтверджують дані про повне змочування розплавами самофлюсівних сплавів досліджуваних карбідів, що є необхідною умовою їх самодовільного просочення [10]. Останнє узгоджується з даними роботи про дослідження змочуваності розплавами самофлюсівних сплавів карбідів [11].

При умовах отримання композиційних матеріалів в нашій роботі також має місце взаємодія між карбідами та розплавом СФС (рис. 2). При цьому, при інших рівних умовах, вища ступінь взаємодії має місце в системі РЕЛІТ – СФС, про що свідчить структура на межі поділу фаз.

Як видно з рисунку (рис. 2, б) в системі РЕЛІТ – СФС спостерігається міграція фраг-

ментів карбиду вольфраму в бік розплаву СФС. Останнє узгоджується з результатами дослідження процесів взаємодії твердих тугоплавких сполук з розплавами металів та їх сплавів [12].

Згідно механізму встановленого в цих роботах процес розчинення карбідів в розплавах металів починається з міграції розплавів по їх межах зерен та субзерен з відокремленням їх від основного масиву та подальшою перекристалізацією через розплав (рис. 3). Термодинамічною умовою таких процесів є виконання умови зменшення міжфазної енергії при утворенні нових поверхонь поділу [13]. У нашому випадку поверхнева енергія на межі поділу карбід – розплав СФС ( $\sigma_{MeC-SFS}$ ) повинна бути меншою ніж поверхнева енергія на межі поділу карбід – карбід ( $\sigma_{Me-Me}$ ). Виходячи з даних роботи [14] вказані поверхневі енергії, при інших рівних умовах, залежать від положення карбідоутворюючого металу в періодичній таблиці ім. Д.І. Менделєєва.

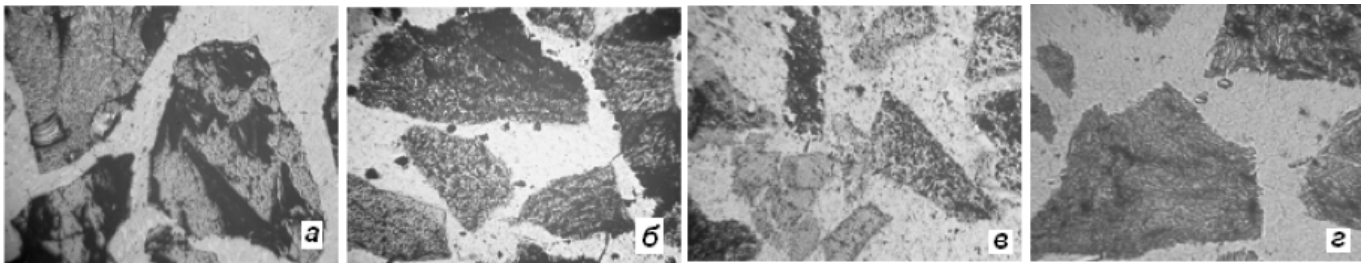


Рис. 1. Структура композиційних матеріалів з композицій РЕЛІТ – СФС та NbC – СФС з різним розміром гранул ( $\times 400$ ) а – карбід ніобію (-063+04); б – РЕЛІТ (-04+0315); в – РЕЛІТ (-0315+02); г – РЕЛІТ (-063+04)

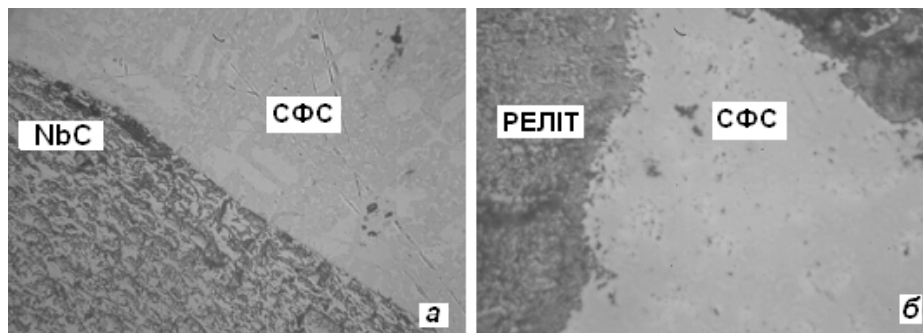


Рис. 2. Структура на межі поділу фаз ( $\times 400$ ) а – NbC – СФС; б – РЕЛІТ – СФС

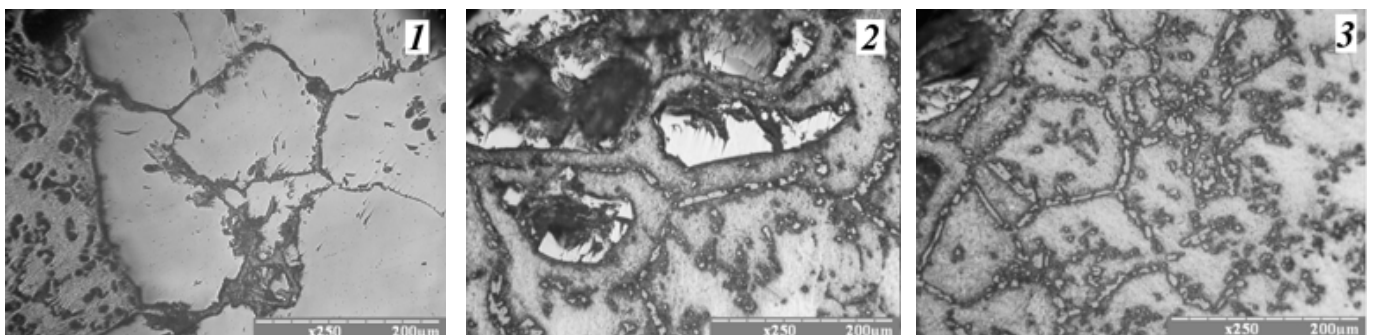


Рис. 3. Типові структури зони взаємодії твердих тугоплавких сполук з розплавами нікелю та заліза від часу взаємодії (хв.) 1 – 5; 2 – 15; 3 – 45 [12]

Як видно з таблиці 1, вірогідність проникнення розплаву металу між зернами карбідів збільшується при переході від карбідоутворюючого металу VIa підгрупи до металу IVa підгрупи таблиці. Виходячи з даних нашої роботи слід передбачити, що така закономірність спостерігається і для наших систем. Спостерігається більша ступінь міграції зерен карбіду ніобію в розплав СФЗ ніж зерен карбіду вольфраму.

Дослідження структури отриманих матеріалів також показує, що на ступінь диспергування гранул карбіду також впливає кривизна поверхні їх граней (рис. 4). Так, збільшення кривизни поверхні (рис. 4, 2) приводить до інтенсифікації диспергування гранул карбідів, особливо карбіду ніобію. Останнє узгоджується з існуючими уявленнями про вплив кривизни поверхні на розчинення твердої фази в рідкій [15].

В роботі проводилось дослідження твердості композицій. Отримані результати наведені на рисунку 5. Аналіз отриманих результатів показує, що вона змінюється залежно від складу композиції і розміру гранул (рис. 5).

Найбільшу твердість мають матеріали з композицій РЕЛІТ – СФС. При цьому найвищу твердість мають композиції РЕЛІТ – СФС (74 HRA) з розміром гранул (-063+04) (рис. 5, 1). Зі зменшенням розміру гранул твердість композицій зменшується. Така ж залежність спостерігається для композицій NbC – СФС. Абсолютні значення твердості для обох композицій сумірні. Дещо більші значення твердості для композицій РЕЛІТ – СФС зумовлені сприятливим збігом значення модуля пружності (735 ГПа) та мікротвердості (15-20 ГПа) для РЕЛІТу, який є практично композиційним матеріалом і складається з вищого карбіду (WC) та субкарбіду вольфраму ( $W_2C$ ). Вищий карбід WC вносить пластичну складову, а  $W_2C$  високу твердість.

### ВИСНОВКИ

Вивчені закономірності утворення структури композиційних матеріалів за участю самофлюсівних сплавів на основі нікелю та гранул литого карбіду вольфраму та ніобію. В досліджених умовах утворюються гетерогенні структури з рівно-

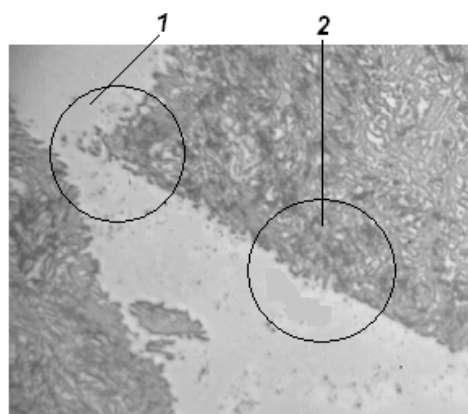


Рис. 4. Структура на межі поділу фаз біля поверхонь карбідів з різною кривизною (x400)

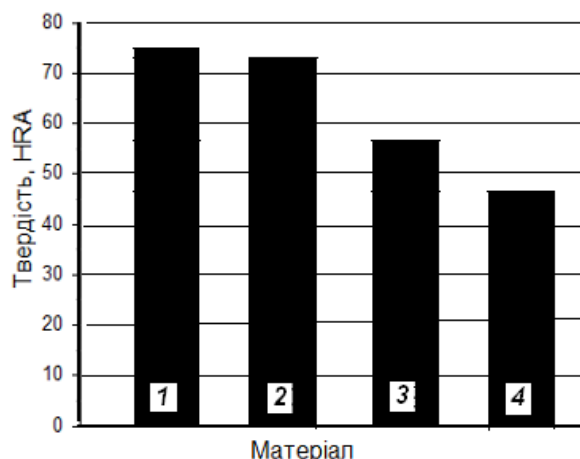


Рис. 5. Залежність твердості композиційних матеріалів від складу та розміру гранул твердої складової. 1 – РЕЛІТ (-063+04); 2 – Карбід ніобію (-063+04); 3 – РЕЛІТ (-04+0315); 4 – РЕЛІТ (-0315+02)

мірним розподілом складових практично стовідсоткової щільності, що свідчить про достатню змочуваність розплавами самофлюсівного сплаву плавлених карбідів вольфраму та ніобію. Встановлена наявність розчинення карбідів у розплаві самофлюсівного сплаву. Більша розчинність карбіду вольфраму зумовлена більшою термодинамічною вірогідністю міграцією розплаву самофлюсівного сплаву між його зернами та субзернами. Встановлена також більша розчинність поверхонь з більшою кривизною.

Таким чином, змінюючи якісний склад вихідних матеріалів можна регулювати структуру і, як наслідок, властивості КМ. Карбід ніобію, поряд з карбідами вольфраму, є перспективним матеріалом для створення зносостійких матеріалів.

Таблиця 1 – Поверхнева і міжфазова енергія в системах карбід металу – кобальт [14]

Система	Поверхнева енергія карбіду, $\sigma_{т.г.}$ , Дж/м <sup>2</sup>	Енергія поверхні поділу кобальт-карбід, $\sigma_{т.р.}$ , Дж/м <sup>2</sup>	Енергія на межі зерен карбіду, $\sigma_{т.г.}$ , Дж/м <sup>2</sup>
TiC – Co	2,215±0,200	0,505±0,200	0,885±0,300
TaC – Co	2,400±0,200	0,550±0,200	0,960±0,300
WC – Co	2,475±0,200	0,575±0,200	0,990±0,300



## ЛІТЕРАТУРА

1. Сиваченко Л. А. Проблема износа рабочего оборудования дробильно-размольных машин /Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк // Трение и износ. – 1995. – 16, №3. – С. 599 – 609.
2. Добровольский А.Г. Абразивная износостойкость материалов: Справочное пособие. /А.Г. Добровольский, П.И. Кошеленко. – К.: Техника, 1989. – 128 с.
3. Степанчук А.М. Використання самофлюсівних сплавів при створенні композиційних матеріалів та покриттів / А.М. Степанчук, О.А. Демиденко, Л.О. Бірюкович, М.Б.Шевчук //Матеріали міжнародної конференції “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра”, – Київ: НТУУ”КПІ”, 2013. – С. 454 – 465.
4. Bao J. Wear-Resistant WC Composite Hard Coatings by Brazing / J. Bao , J.W. Newkirk, S. Bao // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2004. – 13, № 4. – P. 385 – 388.
5. Aiguo L. Microstructures and wear resistance of large WC particles reinforced surface metal matrix composites produced by plasma melt injection / L. Aiguo, G. Mianhuan, Z. Minhai, W. Changbai // Surface & Coatings Technology. – 2007. – 201. – P. 7978 – 7982.
6. Woydt M. Potentials of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear protection / M. Woydt, S. Huang, J. Vleugels at al. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2018. – Vol. 72. – P. 380 – 387.
7. Woydt M. The use of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear resistant tribosystems / M. Woydt, H. Mohrbacher // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – Vol. 49. – P. 21 – 218.
8. Степанчук А. М. Отримання та властивості гранул з тугоплавких сполук для створення композиційних матеріалів. / А.М. Степанчук, М.Б. Шевчук, С.В. Мазаев // Наукові вісті НТУУ”КПІ”. – 2010. – №6. – С. 111 – 119.
9. Полищук В. С. Интенсификация процессов получения карбидов, нитридов и композиционных материалов на их основе. – Севастополь: ”Вебер”, 2003. – 327.
10. Еременко Е.М. Спекание в присутствии жидкой металлической фазы. / Е.Н. Еременко, Ю.В. Найдич, И.А. Лавриненко. – К.: Наук. думка, 1968. – 122 с.
11. Степанчук А.М. Отримання зносостійких композиційних матеріалів за участю самофлюсівних сплавів просочуванням / А.М. Степанчук, М.Б. Шевчук // Наукові вісті НТУУ”КПІ”. – 2013. – №5. – С 87 – 92.
12. Степанчук А.М. Структурутворення при взаємодії РЕЛІТу з розплавами сомофлюсівних сплавів на основі заліза / А.М. Степанчук, М.Б. Шевчук, Л.О. Бірюкович // Металознавство та термообробка. – 2012. – №2. – С.44 – 49.
13. Лисовский А.Ф. Формование структуры композиционных материалов при обработке металлическими расплавами. / А.Ф. Лисовский. – К.: Наукова думка, – 2008. – 198 с.
14. R. Warren. Determination of the Interfacial Energy Ratio in Two-Phase Systems by Measurement of Interphase Contact / R. Warren // Metallography. – 1976. – V. 9. – N 3. – P. 183 – 191.
15. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. / В.И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 527 с.

---

FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF  
COMPOSITES SELF-FLUX ALLOY - MELT CARBIDES OF  
TUNGSTEN AND NIOBIUM

**SUMMARY:** The regularities of the formation of the structure and properties of composite coatings of the system of self-flux alloy (SFA) - carbides of transition metals, in the cast state ((WC-W<sub>2</sub>C), niobium carbide) are investigated. It is established that the method of impregnation can be obtained, dense coating, with the formation of qualitative contact of the components, with each other and with the base. The basic stages of formation of the structure of composites are shown. It was found that when the impregnation process occurs, the solubility of the refractory component in the melt of the self-flux alloy is observed. At the same time, the solubility of (WC-W<sub>2</sub>C) in the SFA is greater than the solubility of the niobium carbide due to higher energy at the grain boundary. The solubility increases with increasing curvature of the surface.

**KEYWORDS:** *self-flux alloy; cast carbides; composite coatings; formation structure; solubility of carbides*